

AT EKSPLODERE ELLER AT IMPLODERE?

Opdagelsen af, at en "forbudt" kernefysisk proces med uventet effektivitet kan transformere grundstoffet neon til fluor, hjælper os med at forstå hvilken skæbne der venter de middeltunge stjerner i vores Galakse.

Stjerner følger i modsætning til os mennesker en forudsigelig bane gennem livet, som primært bestemmes af stjernens masse ved dens tilblivelse. Tunge stjerner med en masse på over 11 gange solens lever et kort og turbulent liv efter forskriften "lev stærkt – dø ung", der slutter med en spektakulær eksplosion – en såkaldt kerne-kollaps supernova. Lette stjerner med en masse på under 7 gange solens lever derimod et længere og noget

mere afdæmpet liv og bliver i deres alderdom til hvide dværgstjerner. Men hvad så med de middeltunge stjerner med en masse på mellem 7 og 11 gange solens? Den gåde har vi fysikere ikke haft held med at løse endnu, men vi er nu kommet et skridt tættere på svaret.

Tunge og lette stjerners endeligt
Stjerner tilbringer det meste af deres liv med at omdanne brint til helium. Ved disse fusionsprocesser frigøres den energi, der gør det

muligt for stjernen at opretholde en tilstrækkelig høj indre temperatur – og dermed tryk – til at modstå tyngdekraften. Når brinten er brugt op, får tyngdekraften overtaget. Stjernens kerne trækker sig sammen, og temperaturen i stjernens indre stiger. Sammentrækningen fortsætter, indtil temperaturen bliver høj nok til, at helium kan fusionere til kulstof og ilt, hvormed en ny ligevægt etableres. Tunge stjerner gennemgår en række sådanne forbrændings-sta-

Forfatteren



Oliver Kirsebom var frem til 2018 ansat som adjunkt på Institut for Fysik og Astronomi på Aarhus Universitet, hvor han især beskæftigede sig med eksperimentel kerneastrofysik. I dag bestrider Oliver en stilling som senior staff scientist på Institute for Big Data Analytics på Dalhousie University i Canada, hvor han arbejder med anvendelser af neurale netværk indenfor marinbiologi og oceanografi. oliver.kirsebom@dal.ca

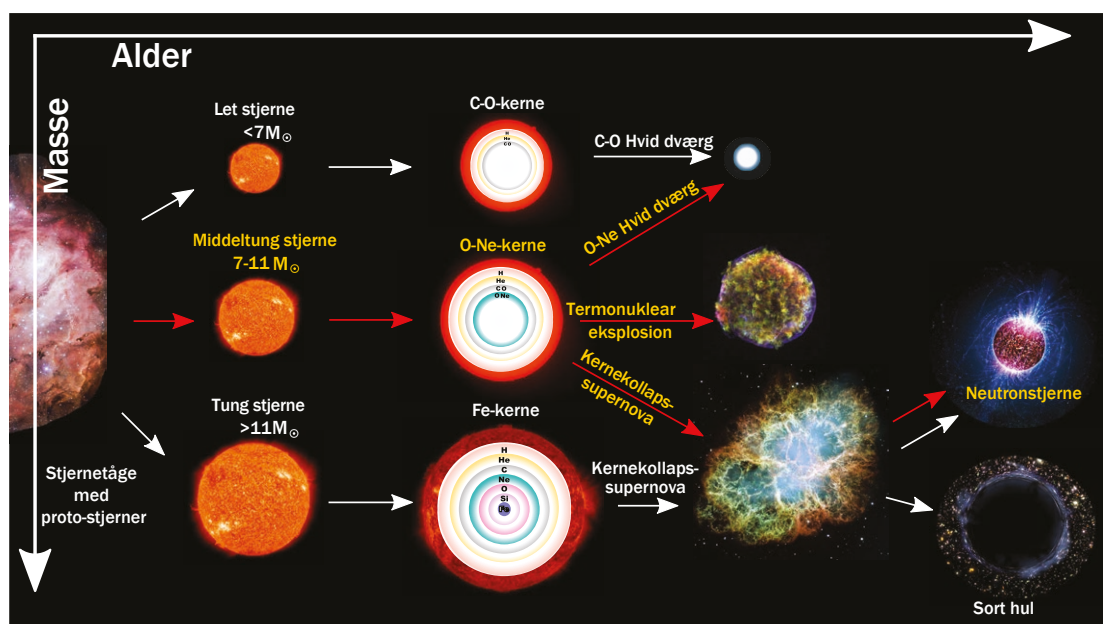
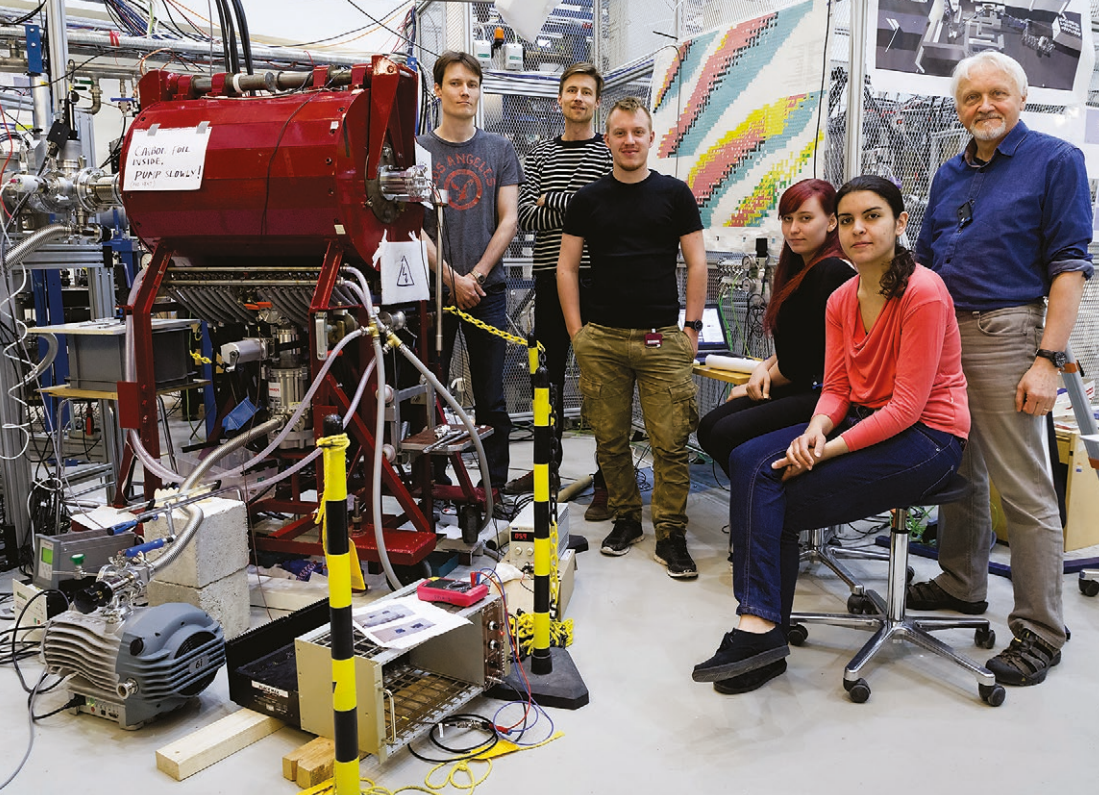


Illustration: Heiko Möller

Diagram over stjerneudvikling, hvor M_{\odot} er solens masse. De røde pile viser de mulige udviklingsforløb for de middeltunge stjerner, som beskrevet i teksten: "Den lette udvej" hvor stjernen bliver til en hvid dværg bestående af ilt (O) og neon (Ne), "den termoneukleare udvej" hvor stjernen sønderriver sig selv i en termoneuklear supernova, og "den tunge udvej" hvor stjernen dør i en kerne-kollaps supernova, der efterlader en neutronstjerne.



På billedet ses en del af det eksperimentelle team stående ved siden af det magnetiske spektrometer, som blev brugt til at måle den forbudte overgang i betahenfaldet af ^{20}F . Billedet er taget i accelerator-laboratoriet på universitet i Jyväskylä, Finland, hvor eksperimentet blev udført. Fra venstre mod højre: Sami Rinta-Antila, Oliver Kirsebom (AU), Michael Munch (AU), Marjut Huukkanen, Laetitia Canete, Wladyslaw Trzaska. Fotograf: Wladyslaw H. Trzaska (selvudløser)

dier, indtil der til sidst ikke er mere kerneenergi at hente i fusionsprocesserne. Stjernen kapitulerer til tyngdekraften og dør i en gigantisk eksplosion, hvor stjernens kerne kolliderer til en neutronstjerne eller et sort hul. Samtidig blæses de grundstoffer, som fusionsprocesserne har frembragt, ud i rummet, hvor de blander sig med den eksisterende interstellare gas og fornyer galaksens grundstofsammensætning.

Anderledes går det de lette stjerner. Når al helium er brugt op, trækker stjernens kerne sig sammen, men temperaturen bliver aldrig høj nok til at antænde den næste forbrændingsproces, fusion af kulstof. Kvantemekanikken lægger sig nemlig i vejen. I takt med at stjernens kerne trækker sig sammen, stiger ikke kun temperaturen, men også tætheden af stof. Imidlertid er der en nedre grænse for, hvor tæt vi kan pakke atomare partikler – det følger af det såkaldte usikkerhedsprincip formuleret af fysikeren Heisenberg, som siger at en kvantepartikels position ikke kan bestemmes til større nøjagtighed end $\hbar/\Delta p$, hvor \hbar er Plancks konstant (divideret med 2π), og Δp betegner nøjagtigheden, hvormed partiklens impuls er kendt. Elektronerne er de første til at ramme denne kvantemekaniske grænse,

og når det sker, modsætter de sig yderligere sammentrækning med det, der betegnes udartningstryk. Således undgår de lette stjerner at gå til grunde i en kerne-kollaps supernova. I stedet blæser kraftige solvinde stjernens ydre lag ud i rummet og efterlader den udartede kerne, en hvid dværgstjerne bestående af kulstof og ilt.

Hvilke udveje har de middeltunge stjerner?

De middeltunge stjerners udvikling minder meget om de lette stjerners udvikling med den forskel, at de middeltunge stjerner formår at antænde og forbrænde kulstof, inden udartningstrykket sætter ind – det er i hvert fald, hvad de astrofysiske stjernemodeller tilsiger. Men hvad der sker efterfølgende er usikkert. Der tegner sig tre muligheder: "Den lette udvej": Kraftige solvinde blæser stjernens ydre lag ud i rummet og efterlader den udartede kerne, en hvid dværgstjerne bestående primært af ilt og neon. "Den tunge udvej": Stjernen dør i en kerne-kollaps supernova, der efterlader en neutronstjerne. "Den termionukleare udvej": Den udartede kerne påbegynder et kollaps, men inden det kan fuldbyrdes, antændes en eksplosiv forbrænding af ilt, der sønderriver stjernen i en termionuklear supernova og efterlader en hvid dværgstjerne bestående af ilt,

neon og en række fusionsprodukter såsom jern.

Blandt de forskere, der beskæftiger sig med problemet, er den herskende opfattelse, at en stor andel af de middeltunge stjerner sandsynligvis vælger den mere stilfærdige, lette udvej, men samtidig forventes det, at en ikke ubetydelig andel eksploderer ved enten at følge den tunge udvej eller den termionukleare udvej. Men hvilken?

Et spørgsmål om elektron-indfangning

For at svare på det spørgsmål, er vi nødt til at kigge nærmere på bestemte kernefysiske processer, der aktiveres i stjernens udartede kerne, når en tilstrækkelig høj massetæthed indtræffer. Stjernens kerne består som tidligere nævnt hovedsageligt af ilt og neon, nærmere bestemt isotoperne ^{16}O og ^{20}Ne . I takt med, at massetætheden øges, vokser udartningstrykket i stjernens kerne og dermed elektronernes kinetiske energi, indtil elektronerne har tilstrækkelig energi til at omdanne ^{20}Ne til ^{20}F . Ved denne proces indfanges en elektron af en ^{20}Ne -atomkerne, hvorved atomkernen omdannes til ^{20}F , mens en neutrino udsendes. Den nydannede ^{20}F -atomkerne indfanger prompte endnu en elektron og omdannes herved til ^{20}O . Som et led i denne

Forbudte overgange

Atomer kan som bekendt eksistere i en række energitilstande. Tilstanden med lavest energi er stabil og betegnes som atomets grundtilstand. Alle andre tilstande kaldes anslåede og vil med tiden henfalde til grundtilstanden. Det sker typisk ved, at en elektron skifter plads til en orbital med lavere energi under udsendelse af en foton.

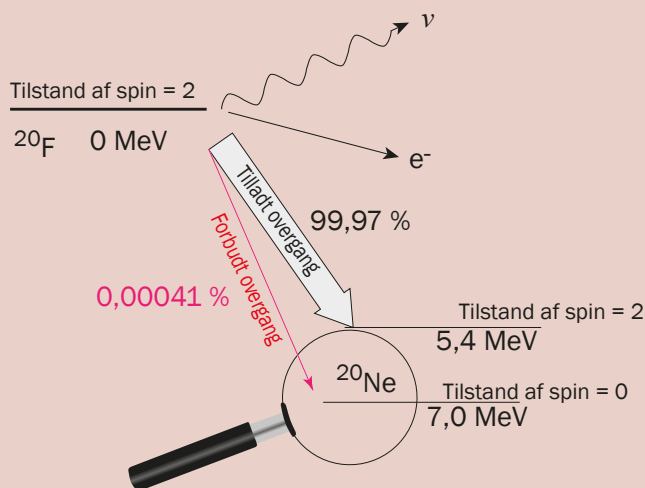
Samme princip gør sig gældende for selve atomkernen. Den kan også eksistere i en række anslåede tilstande, der med tiden henfalder til grundtilstanden. En væsentlig forskel er energiskalaen: Hvor energiforskellen mellem atomets tilstande typisk er nogle få elektronvolt eller blot brøkdele af en elektronvolt, måles energiforskellen mellem kernens tilstande i hundredetusinder eller endda millioner af elektronvolt. I kernefysik bruges derfor enheden megaelektronvolt til at udmåle energier, ofte forkortet til MeV.

Ikke alle atomkerner har stabile grundtilstande, langt fra. Et eksempel herpå er ^{20}F , som beta-henfalder til ^{20}Ne med en halveringstid på 11 sekunder. Ved denne henfaldsproces omdannes en neutron i kernen til en proton under udsendelse af en elektron (betastråling) og en antineutrino med en samlet energi på 5,4 MeV. Dermed er henfaldsprocessen dog ikke helt overstået, for den nyskabte ^{20}Ne kerne fødes

nemlig i en anslået tilstand. Først efter at have udsendt en foton med energi på 1,6 MeV, falder ^{20}Ne kernen til ro i sin grundtilstand. Når ^{20}Ne -kernen ikke fødes i sin grundtilstand, skyldes det, at denne overgang er "forbudt". Det til trods for at overgangen har en større energigevinst (7,0 MeV) end overgangen til den anslåede tilstand (5,4 MeV) og derfor burde synes mere gunstig.

Dette hænger sammen med, at en atomkernes tilstande ikke alene er karakteriseret ved deres forskellige energier, men også ved deres kvantiserede impulsmomenter (også kaldet spin). En grundlæggende egenskab ved beta-henfald er, at det har vanskeligt ved at ændre kernens impulsmoment med mere end 1 kvante-enhed. (Det skyldes fundamentalt set, at de to partikler, der udsendes

ved et betahenfald, en elektron og en neutrino, er meget lettere end atomkernen og derfor giver en meget begrænset rekyleffekt.) Betahenfald vil derfor som regel forbinde kernetilstande med samme impulsmoment eller impulsmomenter, der kun afviger med en enkelt kvante-enhed. Sådanne overgange kaldes for "tilladte" overgange. Overgange, der forbinder tilstande med større spring i impulsmoment, kaldes "forbudte". Det betyder ikke, at de ikke finder sted, men sandsynligheden er kraftigt reduceret sammenlignet med tilladte overgange. Grundtilstanden i ^{20}F og den anslåede tilstand i ^{20}Ne har begge et impulsmoment på 2 enheder, mens grundtilstanden i ^{20}Ne har et impulsmoment på 0, hvilket forklarer hvorfor overgangen til grundtilstanden er forbudt og kun observeres i ringe grad.



sekvens af elektron-indfangninger udsendes også en anseelig mængde gamma-stråling, der omsættes til varmeenergi i stjernens indre. Således har elektronindfangningsprocesserne to vigtige funktioner: De frigør varmeenergi og berøver samtidig stjernen de elektroner, der hjælper med at modstå tyngdekraften. Som konsekvens heraf trækker stjernens kerne sig sammen, massetætheden øges og raten af elektronindfangninger skyder i vejret. På kort tid vokser temperaturen i stjernens kerne til 1,5 milliarder Kelvin, og når det sker, begynder

^{16}O -atomkernerne at fusionere, hvormed varmeproduktionen for alvor løber løbsk i en termonuklear eksplosion.

Nye resultater tipper vægtskålen

Titusinde-kroners-spørgsmålet er nu, om ilt-forbrændingen frigør nok energi til at bremse den igangværende sammentrækning, eller om tyngdekraften bevarer overtaget, så stjernen fortsætter med at trække sig sammen efter ilt-forbrændingen er udsukt. Svaret på det spørgsmål viser sig at afhænge af, hvor tidligt

^{20}Ne begynder at indfange elektroner. For stjernen er det som en dans på en knivsæg. Sker indfangningen, mens massetætheden fortsat er under 10 milliarder gram per kubikcentimeter, vinder ilt-forbrændingen, og stjernen sønderrives i en termonuklear supernova ("den termonukleare udvej"). Sker det senere, får tyngdekraften overtaget, og stjernen dør i en kerne-kollaps supernova ("den tunge udvej").

Tidligere i år publicerede vi sammen med kolleger fra en række andre lande nye resultater, der viser,



På billedet ses forfatteren i gang med at konfigurere datatagningssystemet som forberedelse til en 24-timer lang test af strålingsdetektoren, der blev anvendt til at detektere de høj-energetiske elektroner fra den forbudte overgang. Billedet er taget 1.444 meter under jordens overflade på bunden af Pyhäsalmi-minen i Finland. Her har man indrettet et forskningslaboratorium ved navn Callio Lab, hvor højpræcisionsmålinger kan udføres uden baggrundsstøj fra kosmisk stråling.

Foto: Wladyslaw H. Trzaska

at elektron-indfangningen aktiveres ved en lavere massetæthed, end man hidtil havde troet muligt. Denne opdagelse tipper vægtskålen i ilt-forbrændingens favør og ændrer vores forståelse af de middeltunge stjerners udviklingsforløb. Hvor det længe har været den gængse opfattelse, at de middeltunge stjerner kolliderer til neutronstjerner, tror vi nu, at mange af dem eksploderer i termionukleare supernovaer, der efterlader en hvid dværgstjerne bestående af ilt, neon og en række fusionsprodukter såsom jern.

Helt konkret viser de nye resultater, at ^{20}Ne kan omdannes til ^{20}F ved en såkaldt forbudt overgang (se faktaboks), der aktiveres ved en elektron-energi på 7,0 millioner elektronvolt (MeV) svarende til energiforskellen mellem de to atomkerners grundtilstande. Eftersom denne overgang er forbudt, har man længe troet, at den ingen rolle spillede. I stedet har man regnet med, at elektronindfangningen foregik ved en tilladt overgang til den første anslåede tilstand i ^{20}F , hvilket dog

kræver en noget højere energi på 8,1 MeV og derfor først muliggøres ved højere massetætheder.

Jordiske målinger

For at afgøre, om den forbudte overgang spiller en rolle for elektronindfangningen i middeltunge stjerner, satte vi os for at måle overgangen i et laboratorieeksperiment, hvilket ingen tidligere var lykkedes med. Vores strategi var at betragte den tids-omvendte proces, hvor ^{20}F beta-henfalder til ^{20}Ne og eftervise eksistensen af den forbudte overgang mellem de to kerner grundtilstande i dette radioaktive henfald.

Det forbudte betahenfald til grundtilstanden producerer elektroner med energier op til 7,0 MeV, mens det tilladte – og dermed langt mere sandsynlige – henfald til den første anslåede tilstand i ^{20}Ne kun producerer elektroner med energier op til 5,4 MeV (se faktaboks). Udfordringen var derfor at påvise eksistensen af elektroner med energier over 5,4 MeV og måle, hvor hyppigt, de blev udsendt.

Da ^{20}F henfalder med en halveringstid på bare 11 sekunder, kan henfaldsprocessen kun studeres i specielt indrettede acceleratorlaboratorier, hvor radioaktive isotoper produceres og på kort tid transporteres til en strålingsdetektor. Vi udførte vores eksperiment på et laboratorium i Finland, som er et af få i verden, der kan producere radioaktivt ^{20}F med tilstrækkelig renhed og intensitet til at muliggøre målingen af den forbudte overgang.

Under eksperimentet, som varede en uges tid, blev ^{20}F ionerne transporteret til vores specialdesignede strålingsdetektor, som bestod af et magnetisk spektrometer til at frasortere lavenergi-elektroner og fotoner samt en plastik scintillator til at måle energien af de høj-energi elektroner, der slipper gennem spektrometeret. Således lykkedes det os at detektere 55 elektroner med en energi på mellem 5,4 og 7,0 MeV, og da vi samtidig kunne påvise, at kosmisk stråling kun kunne redegøre for 30 ± 3 af disse detektioner, var missionen lykke-

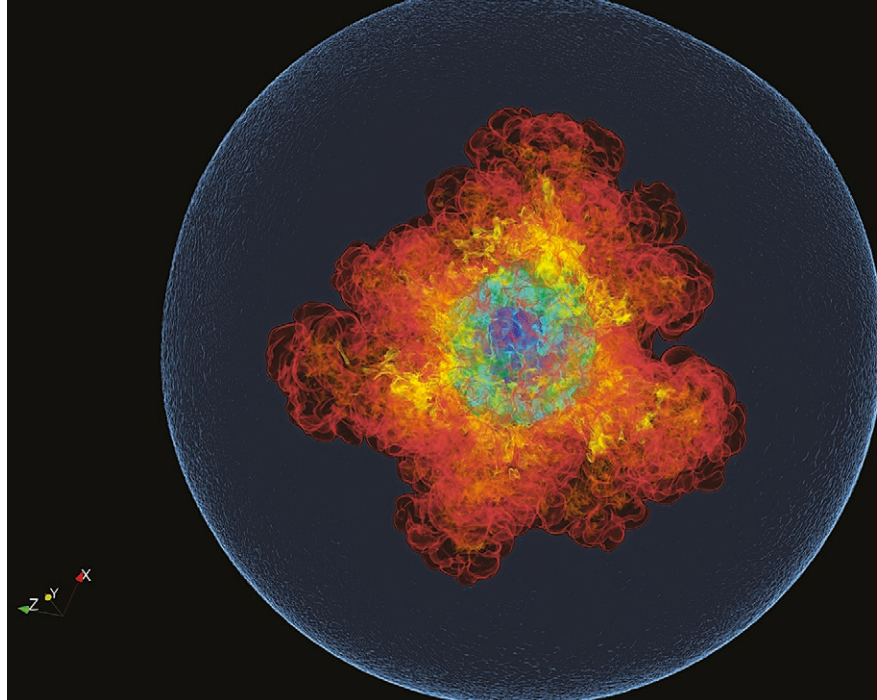
des. Baseret på vores observationer kunne vi konkludere, at 1 ud af hver 250.000 henfald følger den forbudte rute til grundtilstanden. Selvom det ikke lyder af meget, er det faktisk en overraskende stor procentdel, da vi kun kender til én anden forbudt overgang med en ligeså stor styrke.

Konsekvenser for stjerneudvikling

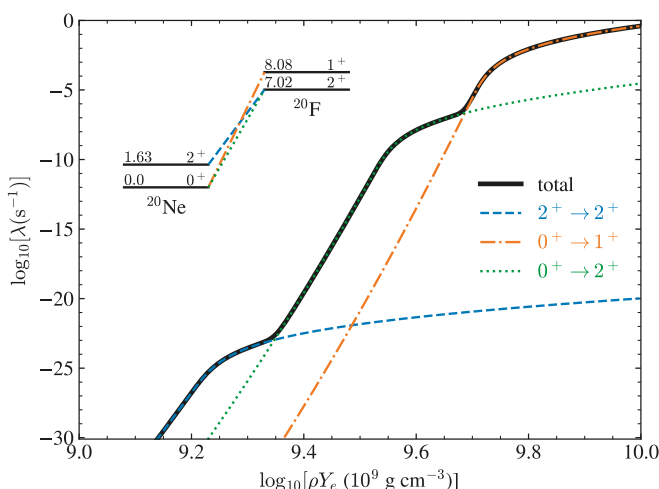
I samarbejde med teoretiske kolleger i Tyskland og USA har vi udført numeriske beregninger for at forstå, hvilke konsekvenser vores eksperimentelle opdagelse har for de middeltunge stjerner udvikling. Her ser vi, at den forbudte overgang gør det muligt for ^{20}Ne at indfangne elektroner på et tidligere stadie. Dermed antændes ilt-forbrændingen ved en lavere massetæthed, den igangværende sammentrækning bremses, og stjernen eksploderer i en termonuklear supernova. Tilbage efterlades en hvid dværgstjerne sammensat af ilt, neon og en række fusionsprodukter, mens resten af stjernens bestanddele blæses ud i verdensrummet, hvor det blander sig med den interstellare gas.

Nu mangler vi bare astronomiske observationer til at efterprøve vores forudsigelser. Desværre har vi ikke en entydig forventning om, hvordan disse termonukleare supernovaer vil tage sig ud på nattehimmelen. Det kan gøre det vanskeligt for astronomer at skelne dem fra de mange andre typer supernovaer, der findes. Til gengæld kender vi ikke til andre astrofysiske processer, der resulterer i hvide dværgstjerner med samme sammensætning af ilt, neon og andre fusionsprodukter. Hvis en sådan dværgstjerne en dag observeres, vil det give stærk evidens for modellen.

Indtil videre er der kun indirekte evidens til at bestyrke vores tro på modellen. For eksempel forventes den termonukleare supernova at producere store mængder af bestemte isotoper såsom ^{48}Ca , ^{50}Ti og ^{54}Cr , der kun dannes i begrænsede



Resultat af en numeriske simulering af en termonuklear supernova igangsæt af de "forbudte" elektronindfangninger på ^{20}Ne . Farvelægningen viser isotopsammensætningen af de grundstoffer, som produceres i eksplosionen. I de blå områder finder vi isotoper med en større andel af neutroner end protoner, mens de røde områder indeholder isotoper med en mere balanceret fordeling af neutroner og protoner. Den høje grad af ubalance mellem neutroner og protoner i de blå områder er unik for denne type supernova.



På denne figur ses raten, hvormed ^{20}F indfanger elektroner ved en temperatur på 400 millioner Kelvin, afbildet som funktion af massetætheden i stjernens indre. Bemærk, at begge akser er logaritmiske. Den grønne, prikkede kurve viser bidraget fra den forbudte overgang. Det ses, at indfangningsraten i en periode øges med op til 8 størrelsesordere (dvs. en faktor 100.000.000!) sammenlignet med den rate, man får, når man ser bort fra den forbudte overgang.

mængder i andre type stjerne-eksplosioner. Analyser viser, at de termonukleare supernovaer kun behøver at udgøre cirka 0,5% af det samlede antal supernovaer i vores galakse for at kunne forklare den relativt høje forekomst af netop disse tre isotoper.

Endelig er der spørgsmålet om konvektion. Selvom vi nu har fået styr på elektronindfangnings-

processerne, forbliver det uklart, om varmeproduktionen er kraftig nok til at sætte gang i konvektion i stjernens indre. Vores nuværende modeller antager, at det ikke er tilfældet. Tager vi fejl, kan det betyde, at ilt-forbrændingen antændes senere, og stjernen trods alt kolliderer til en neutronstjerne. Her sætter vi vores lid til, at bedre modeller for konvektion i stjerner snart ser dagens lys. ■

Figuren er fra S. Jones et al., *Astron. Astrophys.* 622, A74 (2019).

Figuren er fra Kirsebom et al., *Phys. Rev. Lett.* 123, 262701 (2019).

Videre læsning
O. S. Kirsebom et al., *Phys. Rev. Lett.* 123, 262701 (2019).

O. S. Kirsebom et al., *Phys. Rev. C* 100, 065805 (2019).

Forskningsarbejdet beskrevet i denne artikel blev muliggjort takket være et legat fra Villum Fonden.